

ЯДЕРНЫЙ МАГНИТНЫЙ РЕЗОНАНС В ИРКУТСКОМ ИНСТИТУТЕ ХИМИИ СО РАН

© 2022 г. В. К. Воронов^{a,*}

^aИркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

*E-mail: vladim.voronov1945@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.02.2022 г.

После доработки 21.02.2022 г.

Принята к публикации 31.03.2022 г.

Публикация посвящена начальному периоду применения методов ядерного магнитного резонанса высокого разрешения в Иркутском институте органической химии СО АН СССР (ныне – ИрИХ СО РАН). Со второй половины 1960-х годов началось формирование иркутской школы по использованию радиоспектроскопических и квантово-химических методов исследования молекулярного строения. Этому предшествовало открытие ядерного магнитного резонанса в конденсированных средах. Исключительная информативность экспериментальных данных, получаемых с помощью этого явления, и всё возрастающая универсальность спектрометров делают методы магнитного резонанса главенствующими в широком круге научных исследований.

Отмечается роль руководства института, прежде всего профессора Ю.Л. Фролова, в создании иркутской научной школы. Представлены результаты исследований, выполненных с участием автора публикации методами спектроскопии ЯМР соединений, синтезированных в ИрИХ СО РАН. Центральное место занимали азолы, содержащие биологически активный гетероцикл. Указанные соединения чрезвычайно распространены в природе. Они играют важную роль в биологических процессах и нашли разнообразное применение в медицине и технике.

Ключевые слова: ядерный магнитный резонанс, строение и динамика молекул, иркутская научная школа магнитного резонанса высокого разрешения.

DOI: 10.31857/S0869587322090110

Одним из главных результатов развития естествознания за последние 50–60 лет стало формирование новой области знаний, возникшей на стыке нескольких дисциплин. Речь идёт о разделе науки, занимающейся изучением строения и динамики молекул, в широком смысле – об исследовании материи на молекулярном уровне. Конечная цель такого исследования – установление

электронного и пространственного строения многоэлектронных (молекулярных) систем, а также природы процессов и явлений, происходящих с их участием. Важность указанного раздела более чем очевидна для изучения конденсированного (твёрдого и жидкого) состояния вещества, а значит, для более глубокого понимания явлений в окружающем нас мире, в частности, с целью их использования в решении широкого круга практических задач. Среди современных методов исследования молекулярного строения вещества особое место занимают методы, основанные на использовании специфических свойств атомных ядер и их электронных оболочек, – методы магнитного резонанса, прежде всего ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Исключительная информативность экспериментальных данных, получаемых с его помощью, и всё возрастающая универсальность спектрометров ЯМР при их использовании в повседневной практике делают методы магнитного резонанса главенствующими в широком круге научных исследований.



ВОРОНОВ Владимир Кириллович – доктор химических наук, профессор ИРНТУ.

Первые попытки обнаружить ЯМР в конденсированном состоянии относятся к 1936 г., когда К. Гортер (Нидерланды) пытался наблюдать резонанс ядер лития и ядер атома водорода в алюмокалиевых квасцах. Другая безуспешная попытка была предпринята К. Гортером совместно с Л. Бруром в 1942 г. Основной причиной неудач их опытов был выбор неподходящих объектов. Лишь в конце 1945 г. двумя группами американских физиков под руководством Ф. Блоха (Стэнфордский университет, США) и Э. Парселла (Гарвардский университет, США) были получены настоящие сигналы ядерного магнитного резонанса. Блох наблюдал это явление на протонах (ядрах атома водорода) в воде, а Парселл добился успеха в обнаружении ядерного резонанса на протонах в парафине. За это открытие они в 1952 г. были удостоены Нобелевской премии по физике. Этапными стали исследования, выполненные профессором Цюрихского политехнического института Р. Эрнстом (Швейцария) с сотрудиниками, по разработке и внедрению в повседневную практику принципиально новых методов спектроскопии ЯМР (Нобелевская премия по химии за 1991 г.). Ещё две Нобелевские премии, связанные с ЯМР, были вручены уже в XXI в. за исследования, послужившие основой разработок большой практической значимости. В 2002 г. Нобелевская премия по химии (1/2 часть) была присуждена К. Вютриху (Швейцария) за разработку на основе ЯМР метода установления трёхмерной структуры белковых молекул. Нобелевская премия по физиологии и медицине за 2003 г. была присуждена П. Лотербуру (США) и П. Мэнсфилду (Великобритания) за создание магниторезонансных томографов, позволяющих получать изображение целого организма.

Основное преимущество ЯМР по сравнению с другими видами спектроскопии – возможность преобразования и видоизменения ядерного спинового гамильтониана по воле экспериментатора практически без каких-либо ограничений и подгонки его под специальные требования решаемой задачи. Такая возможность обусловлена определёнными причинами. Благодаря тому, что ядерные взаимодействия являются слабыми, можно ввести сильные возмущения, достаточные для того, чтобы подавить нежелательные взаимодействия. Модификация спинового гамильтониана играет важную роль во многих приложениях ЯМР-спектроскопии. Широкое распространение получило упрощение спектров или повышение их информативности с помощью спиновой развязки, когерентного усреднения многоимпульсными последовательностями, вращения образцов или частичной ориентации в жидкокристаллических растворителях. Неудивительно, что довольно быстро методы ЯМР нашли успешное применение (прежде всего в химии и физике) при

проведении исследований фундаментального характера, когда речь идёт о строении вещества, его молекулярной структуре, межмолекулярных взаимодействиях и различных формах внутримолекулярных движений (молекулярная динамика).

В конце XX – начале XXI в. роль методов магнитного резонанса изменилась принципиальным образом. Всё усиливающийся интерес исследователей к методам магнитного резонанса во многом связан со значительным потенциалом их прикладного использования. В связи с этим можно упомянуть структурную биологию, биофизику и биохимию, изучение природных образований, вирусологию, агрономию, неврологию и другие области. Конечно, здесь уместно отметить использование ЯМР в клинической медицине в связи с возможностью визуализации целых биологических организмов. Современные ЯМР-томографы позволяют делать “срезы” в любой плоскости живого организма с разрешением 1 мм и меньше. Во всём мире стремительно растёт количество исследовательских групп, активно использующих методы ЯМР для решения конкретных задач, связанных с биологическими системами и биологическим материалом. Во многих странах очень сложно найти вузы и научно-исследовательские учреждения, где не используют современные ЯМР-установки [1–11].

Увеличение круга задач обусловлено как прогрессом техники спектроскопии ЯМР, так и достижениями в изучении самого явления. Создание установок с рабочей частотой по протонам 500 МГц и выше, а также для детектирования ЯМР-сигналов от твёрдой фазы с широкими возможностями манипулирования детектируемой спектральной информацией сделало возможным изучение молекулярного строения больших (прежде всего биологически важных) молекул. Существенное расширение сферы использования ЯМР стало также следствием более глубокого осмысления этого явления в комплексных соединениях, которые очень часто синтезируются на основе эссенциальных, то есть жизненно необходимых, элементов (кальций, магний, кобальт, никель, железо, цинк, кадмий и др.), которые входят в состав ферментов и витаминов и обеспечивают потребности организма в необходимых микроэлементах. Всё это обусловило расширение круга практических задач, которые могут решаться на основе ЯМР [12, 13].

Развитие электроники, физики и технологии магнитных материалов позволило сконструировать малогабаритные, экономичные и достаточно простые в обращении релаксометры ЯМР, предназначенные для технологических целей и использования в заводских условиях. Совсем недавно за рубежом начался выпуск коммерческих спектрометров ЯМР, сочетающих в себе хоро-

шую разрешающую способность, высокую чувствительность (соотношение сигнал/шум примерно 200:1) и сравнительно небольшой вес магнитов (в пределах 75 кг), что позволяет считать их настольными установками. Следовательно, открывається возможность использования таких спектрометров в аналитических (в том числе заводских) лабораториях, совмещая начальную стадию научных исследований с решением прикладных задач.

Становление метода ЯМР в Иркутске. Автор данной публикации принадлежит ко второй волне молодых энтузиастов, решивших посвятить себя исключительно красивой и чрезвычайно, как потом оказалось, востребованной области науки – спектроскопии ядерного магнитного резонанса высокого разрешения. Среди них были, конечно, и другие начинающие исследователи: Р.З. Сагдеев, Н.М. Сергеев, А.В. Аганов, В.И. Чижик, Г.А. Калабин, Л.Е. Ниворожкин, В.А. Пестунович. Это случилось во второй половине 1960-х годов. Тогда перспективы спектроскопии ЯМР как нового научного направления ещё только обозначались. К тому времени были сделаны первые шаги на пути становления спектроскопии ЯМР как науки. Что касается СССР и стран СНГ, прежде всего России, то методы магнитного резонанса заняли прочное место в научно-исследовательских лабораториях. В различных городах (Москва, Новосибирск, Казань, Санкт-Петербург, Таллин, Ростов-на-Дону, Иркутск, Краснодар, Рига и др.) возникли научные школы по использованию указанных методов со своими оригинальными задачами и подходами к их решению. Публикации советских (российских) учёных в международных изданиях, равно как и участие в научных конференциях, стали обычным делом. Наверное, здесь уместно назвать наших учителей, раньше других оценивших перспективность методов магнитного резонанса в изучении молекулярного строения. Среди них Э.И. Федин, В.Ф. Быстров, Ю.А. Устынюк, А.Л. Бучаченко, Н.Н. Шапетько, Ю.Ю. Самитов, В.В. Воеводский, Ю.Н. Молин, П.М. Бородин.

Начало исследований молекулярного строения методами ЯМР в Иркутске было положено в 1966 г., когда Ю.Л. Фролов, к тому времени защитивший кандидатскую диссертацию, обратился к руководству физического факультета Иркутского государственного университета с просьбой рекомендовать кого-то из студентов, чтобы он после выполнения дипломной работы был распределён в Иркутский институт органической химии СО АН СССР (ИрИОХ, ныне – Иркутский институт химии им. А.Е. Фаворского СО РАН). Вскоре после этого Фролов договорился с Новосибирским институтом химической кинетики и горения СО АН СССР о том, что на период преддипломной практики и на время выполнения ди-

пломной работы будущий сотрудник ИрИОХа будет направлен в этот институт. Автору данной публикации повезло – именно он был рекомендован деканом физфака Иркутского университета Ю.Л. Фролову. Дипломная работа, выполненная под руководством Ю.Н. Молина и Е.Е. Заева, закончилась её защитой в июне 1967 г.

Уместно обратить внимание на то обстоятельство, что в те годы удалось установить творческий контакт между упомянутыми выше академическими институтами. Это заслуга Юлия Леонидовича Фролова (впоследствии – доктора химических наук, профессора), который прекрасно понимал важность методов магнитного резонанса для изучения строения и динамики молекул, а следовательно, для включения их в практику научных исследований, проводимых в ИрИОХе. Результаты дипломной работы автора статьи стали основой для написания научной статьи, опубликованной в январе 1968 г. в международном периодическом издании [14]. Это одна из первых публикаций, в которой была показана эффективность использования явления ЯМР в парамагнитных системах для изучения пространственного строения многоэлектронных (молекулярных) систем.

После начала работы в ИрИОХе с августа 1967 г. автор представленной статьи регулярно ездил в служебные командировки в Новосибирск – в Институт химической кинетики и горения СО РАН – для снятия спектров ЯМР соединений ИрИОХа. Эти спектры затем расшифровывались, чтобы извлекаемая из них информация могла быть использована в исследованиях. Полученные таким образом спектральные данные позволили в 1968, 1969 и 1970 гг. опубликовать не менее 25 статей, в которых приводились спектры ЯМР синтезированных в ИрИОХе соединений. Параллельно руководство института вело работу по приобретению собственного спектрометра ЯМР высокого разрешения. В конечном счёте усилия увенчались успехом – в 1970 г. был приобретён спектрометр BS 487B фирмы Tesla высокого разрешения с резонансной частотой по протонам 80 МГц. Именно эта фирма начала выпускать ЯМР для СССР. Основные заботы по его приобретению легли на Ю.Л. Фролова, которому автор данной публикации всемерно помогал, тем более что закончил университет по специальности “Радиофизика и электроника”. За время пребывания в Новосибирске был получен ценный практический опыт по записи спектров ЯМР, а также по эксплуатации и ремонту ЯМР-спектрометров. На тот момент приобретённый ИрИОХом спектрометр был высокого качества. К концу 1970 г. его запустили в эксплуатацию.

Уже в конце 1960-х – начале 1970-х годов методы спектроскопии ЯМР достаточно прочно во-

шли в работу Иркутского института химии СО РАН. Фактически были заложены основы самостоятельной по статусу лаборатории, задачей которой должно было стать проведение исследований синтезируемых в ИрИОХе соединений, строения и динамики молекул с использованием новых методов магнитного резонанса. Важно также, что ИрИОХ к тому времени уже занял свою достойную нишу в мировой химической науке. Лаборатория радиоспектроскопии была создана в 1971 г. по решению вновь назначенного директора института члена-корреспондента АН СССР М.Г. Воронкова (впоследствии — академик РАН). На должность руководителя лаборатории был приглашён кандидат химических наук В.А. Пестунович.

Вскоре после ввода в эксплуатацию в Иркутском институте органической химии спектрометра ЯМР высокого разрешения на химическом факультете Иркутского госуниверситета началась работа по созданию лаборатории, основу которой должны были составить исследования молекулярного строения методами магнитного резонанса. Главная заслуга в успешном завершении этой работы принадлежит Г.А. Калабину (впоследствии доктор химических наук, профессор). Лаборатория активно сотрудничала с ИрИОХом. История лаборатории и её исследований заслуживает отдельной публикации.

В 1982 г. С.Б. Леонов, бывший тогда ректором Иркутского политехнического института (ИПИ) (в настоящее время — Иркутский национальный исследовательский технический университет — ИРНИТУ), предложил автору данной публикации перейти на работу в этот вуз на должность заведующего кафедрой физики. Предложение было принято, при этом сотрудничество с ИрИОХом продолжалось. К тому времени ИПИ приобрёл спектрометр ЯМР высокого разрешения фирмы Tesla. Сотрудничество укрепилось после того, как в 1997 г. в составе кафедры физики ИПИ была организована учебно-исследовательская лаборатория ядерного магнитного резонанса и был приобретён высококлассный спектрометр ЯМР немецкой фирмы Bruker с резонансной частотой по протонам 250 МГц. Основные объекты, спектры ЯМР которых записывались в лаборатории, — соединения, синтезируемые в ИрИОХе. Получаемая спектральная информация использовалась для подготовки совместных публикаций. Результаты коллективных исследований нашли отражение в защите диссертаций, участии в конференциях и семинарах различного уровня и в многочисленных публикациях в отечественных и зарубежных профессиональных журналах. Именно на кафедре физики сформировались как профессионалы доктор химических наук профессор А.В. Афонин, кандидаты химических наук А.В. Ващенко, И.А. Ушаков, И.Л. Кривдина, Е.Л. Ли-

повченко, Д.К. Данович, С.Ю. Кузнецова. Четверо из данного списка в настоящее время являются сотрудниками ИрИОХа СО РАН.

Сотрудники кафедры физики ИПИ провели ряд исследований с коллегами других (помимо ИрИОХа) научных и учебных организаций России и Украины. В связи с этим нужно упомянуть изучение по спектрам ЯМР стереохимически жёстких гетероспиновых комплексов никеля и кобальта со стабильными нитроксильными радикалами. Эти и другие аналогичные гетероспиновые системы привлекают внимание как исходные продукты для получения молекулярных магнетиков. Часть публикаций посвящена дизайну молекулярных систем. Данные исследования выполнены под руководством академиков РАН Р.З. Сагдеева и В.И. Овчаренко, при участии доктора химических наук А.В. Подоплелова (Международный томографический центр СО РАН) [15].

Исследования молекулярного строения синтезированных в ИрИОХе соединений методами спектроскопии ЯМР. Предметом исследовательских работ, выполненных с участием автора статьи, был анализ состава, строения (пространственного и электронного) и внутримолекулярной динамики молекулярных (многоэлектронных) систем по спектрам ЯМР, полученным от ядер атома водорода (методами протонного магнитного резонанса — ЯМР ^1H) и атома углерода (ЯМР ^{13}C). В ряде случаев использовались также спектры ЯМР от других ядер. Изучались соединения различных классов, содержащих в своём составе гетероатомы (азот, кислород, сера, кремний, фосфор), а также функциональные группы. Серия работ относится к изучению координационных соединений, синтезируемых на их основе. Обсуждались конформационные переходы и таутомерия молекулярных систем, внутримолекулярные водородные связи, поворотная изомерия, конкурентная координация, природа связей металл–лиганд, механизмы химических превращений. Почти все изученные соединения и их комплексы являются новыми (впервые синтезированными либо выделенными из природного сырья), ряд из них обладает практически полезными свойствами. Научный руководитель исследований — академик РАН Б.А. Трофимов.

Центральное место в исследованиях занимали пятичленные гетероциклические соединения, содержащие в цикле два или три атома азота. Они чрезвычайно распространены в природе, играют важную роль в биологических процессах и нашли разнообразное применение в медицине и технике. Этим объясняется неослабевающий интерес учёных к производным имидазола, пиразола и триазола, а также к их комплексам с солями переходных металлов и различными электроноакцепторами. Исследования перечисленных азотсодер-

жащих гетероциклов и их комплексов проводились в тесном сотрудничестве с докторами наук профессорами Г.Г. Скворцовой, Е.С. Домниной и их сотрудниками. Преобладающими объектами при этом были гетероциклы, содержащие в своём составе винильную ($\text{CH}_2=\text{CH}-$) группу [16–18].

Серия спектральных работ освещает установление связи между особенностями внутримолекулярного строения и параметрами спектров ЯМР ^1H и ^{13}C исследованных соединений. Следует выделить работы, в которых обсуждается использование для этих целей дальних спин-спиновых взаимодействий, проявляемых в спектрах ЯМР. Подобные научные изыскания направлены на решение фундаментальной проблемы строения многоэлектронных систем, связанной с установлением спектральных проявлений внутримолекулярной динамики. В рамках этой проблемы центральное место занимает установление спектральных проявлений конформационных особенностей молекул. Цель исследований – изучение строения и динамики органических гетероатомных соединений и их комплексов методами спектроскопии ЯМР и квантово-химических расчётов. Осмысление молекулярной стереодинамики расширяет не только наши знания о тонких деталях внутримолекулярного строения, но является также ключом к планированию направленного синтеза соединений, в том числе с прогнозируемыми характеристиками. Так, систематическое изучение спектров ЯМР ^1H и ^{13}C широкого круга замещённых N-винилпирролов позволило провести конформационный анализ не только указанных веществ, но и других классов N-винильных соединений [19].

Помимо констант спин-спинового взаимодействия, проявляемых в спектрах ЯМР, для выявления тонких деталей пространственного и электронного строения многоэлектронных (молекулярных) систем нами использовались и химические сдвиги резонансных ЯМР-сигналов. Следует обратить внимание на результаты изучения спектров ЯМР широкого круга кетоксимов с алкильными, алкельными, арильными и гетерильными заместителями. Выявленная в процессе исследований стереоспецифичность констант экранирования углеродных атомов в E- и Z-изомерах позволила, в частности, предложить простой и вместе с тем достаточно универсальный метод установления конфигурации кетоксимов и их производных [20].

Предметом исследований большого цикла работ были механизмы химических превращений, в том числе идентификация их конечных продуктов. Так, исследователями Иркутского института химии СО РАН было установлено, что реакции нуклеофильного присоединения вторичных фосфинсульфидов к альдегидам азольного ряда вы-

ступают простым методом синтеза новых полифункциональных хиральных гетероциклических соединений, которые могут играть роль высоко-реакционных строительных блоков для органического синтеза. Кроме того, эти соединения – предшественники оптически активных амфифильных лигандов для энантиоселективных процессов. Такие соединения, содержащие системы кратных связей, атомы с неподелёнными парами электронов и подвижные атомы водорода, являются сложными по своему строению объектами. Поэтому логично, что продукты превращения, получаемые в реакциях (в том числе и при комплексообразовании) с их участием, могут быть самыми разнообразными. Полный анализ спектров ЯМР ^1H , ^{13}C , ^{15}N , ^{31}P позволил получить спектральную информацию, крайне необходимую при поэтапном анализе результатов химических превращений полифункциональных гетероциклов [21].

Предметом отдельного исследования данных мультаядерной спектроскопии ЯМР (^1H , ^{13}C , ^{15}N , ^{17}O) в совокупности с квантово-химическими расчётами служит специфическое внутримолекулярное взаимодействие типа слабой водородной связи в ряде классов соединений, в том числе в сложных виниловых эфирах, 1-винилпиридонах, изохинолонах, 10-винилакридонах, виниловых сульфидах азотсодержащих гетероциклов. Имеется в виду взаимодействие через пространство α -атома водорода винильной группы с одним из гетероатомов молекулы, содержащей эту группу. Установлены природа указанного взаимодействия, влияние на электронное строение молекул, найдены количественные характеристики его проявления в спектрах ЯМР (в соавторстве с доктором химических наук профессором А.В. Афониным). Помимо значимости этих результатов для расширения наших представлений об особенностях внутримолекулярного строения сложных по составу и строению молекул, полученные данные представляют самостоятельный интерес с точки зрения использования спектроскопии ЯМР в структурных исследованиях. Это было продемонстрировано в процессе установления особенностей пространственного строения изученных соединений, содержащих в своём составе гетероатомы и функциональные группы [22].

На протяжении ряда лет велись исследования соединений (совместно с доктором химических наук профессором Н.А. Тюкавкиной, кандидатами химических наук Л.Д. Модоновой и А.А. Громовой), экстрагируемых из хвойных растений, произрастающих в Сибирском регионе. Предметом отдельных изысканий стало, в частности, выяснение роли лигнинов в жизнедеятельности растений и путей их биогенеза. На этом этапе был выделен ряд неизвестных ранее соединений и

установлена их молекулярная структура. Плодотворными оказались выполненные под руководством академика РАН М.Г. Воронкова исследования комплексообразующей способности и строения нового класса биологически активных соединений — Si-замещённых силатранов [23–25].

Значительная часть публикаций посвящена изучению особенностей явления ЯМР в парамагнитных системах, специфика которых определяется характером электронно-ядерного или сверхтонкого взаимодействия (СТВ) с участием электронов, локализованных на *d*- или *f*-орбиталях. Изучались (при активном участии кандидата химических наук И.А. Ушакова): механизмы делокализации нескомпенсированной электронной плотности на лиганды и по лигандам; далёкая делокализация; лигандный обмен; релаксационные процессы в парамагнитных системах; влияние условий записи спектров на детектирование сигналов ЯМР, обусловленных ядрами, входящими в состав парамагнитных систем. Результатом стала разработка (совместно с новосибирскими коллегами) метода спектрального анализа, основанного на использовании закономерностей СТВ (метода парамагнитных добавок в спектроскопии ЯМР). Кроме того, показана реальная возможность получения информации, нередко уникальной, о строении сложных молекулярных систем по спектрам ЯМР, трансформированных СТВ. Это было наглядно продемонстрировано при исследовании явления ЯМР в сложных стерически нежёстких парамагнитных системах, содержащих в качестве окружения центрального металла многоэлектронные гетероатомные структуры [26–31].

ЛИТЕРАТУРА

1. Эмсли Дж., Финей Дж., Сатклиф Л. Спектроскопия ядерного магнитного резонанса высокого разрешения. В 2 т. / Пер. с англ., под ред. В.Ф. Быстрова, Ю.Н. Шейнкера. М.: Мир, Т. 1, 1968; Т. 2, 1969.
2. Хеберлен У., Меринг М. ЯМР высокого разрешения в твёрдых телах / Пер. с англ., под ред. Г.В. Скоцкого, Э.Т. Липпмаа. М.: Мир, 1980.
3. Сликтер Ч.П. Основы теории магнитного резонанса. 2-е изд., пересм., доп. и испр. / Пер. с англ., под ред. Г.В. Скоцкого. М.: Мир, 1981.
4. Сергеев Н.М. Спектроскопия ЯМР. М.: Изд-во МГУ, 1981.
5. Федотов М.А. Ядерный магнитный резонанс в растворах неорганических веществ. Новосибирск: Наука, 1986.
6. Воронов В.К. Метод парамагнитных добавок в спектроскопии ЯМР. Новосибирск: Наука, 1989.
7. Эрнст Р., Боденхаузен Дж., Вокаун А. ЯМР в одном и двух измерениях / Пер. с англ., под ред. К.М. Салихова. М.: Мир, 1990.
8. Воронов В.К., Сагдеев Р.З. Основы магнитного резонанса. Иркутск: Восточно-Сибирское книжное изд-во, 1995.
9. Chizhik V.I., Chernyshev Yu.S., Donets V. et al. Magnetic Resonance and Its Applications. Switzerland: Springer International Publishing, 2014.
10. Панюшкин В.Т., Черныш Ю.Е., Волынкин В.А. и др. Ядерный магнитный резонанс в структурных исследованиях. М.: КРАСАНД, 2016.
11. Калабин Г.А., Каницкая Л.В., Кушнарёв Д.Ф. Количественная спектроскопия ЯМР природного органического сырья и продуктов его переработки. М.: Химия, 2000.
12. Ushakov I.A., Voronov V.K., Adamovich S.N. et al. The NMR study of biologically active metallated alkanol ammonium ionic liquids // Journal of Molecular Structure. 2016. V. 1103. P. 125–131.
13. Voronov V.K. The study of structure and dynamics of molecules: NMR spectra transformed by superfine coupling // Magn. Reson. Chem. 2015. V. 53. P. 188–193.
14. Zaev E.E., Voronov V.K., Shvartsberg M.S. et al. Application of paramagnetic additions to the structure determination of some pyrazoles by NMR // Tetrahedron Letters. 1968. № 5. P. 617–622.
15. Сагдеев Р.З., Воронов В.К., Подоплелов А.В. и др. Особенности спектров ЯМР гетероспиновых комплексов // Известия АН. Серия химическая. 2001. № 11. С. 1986–1994.
16. Воронов В.К., Еськова Л.А., Домнина Е.С., Скворцова Г.Г. Об участии пиррольного азота в комплексообразовании // Известия АН СССР. Серия химическая. 1980. № 7. С. 1666–1668.
17. Еськова Л.А., Воронов В.К., Домнина Е.С., Скворцова Г.Г. Спектры ЯМР и строение 1-винилпиразолов // Известия АН СССР. Серия химическая. 1985. № 5. С. 1012–1018.
18. Скворцова Г.Г., Тржицинская Б.В., Тетерна Л.Ф. и др. Комплексные соединения ионов металлов I, II, VII и VIII групп с 3-винилтио-1,2,4-триазолами // Журнал общей химии. 1987. № 4. С. 763–767.
19. Афонин А.В., Ушаков И.А., Петрова О.В. и др. Изучение пространственного и электронного строения ряда 2-(пиридил)пирролов по спектрам ЯМР ^1H и ^{13}C // Журнал органической химии. 2000. Т. 36. С. 1043–1049.
20. Афонин А.В., Ушаков И.А., Тарасова О.А. и др. Простой метод установления конфигурации кетоксимов и их производных по спектрам ЯМР ^{13}C // Журнал органической химии. 2000. Т. 36. С. 1831–1837.
21. Воронов В.К., Боровик М.А., Ушаков И.А. и др. Спектры ЯМР тиофосфорил- и фосфорилазолов // Известия АН. Серия химическая. 2009. № 7. С. 1471–1475.
22. Афонин А.В., Воронов В.К., Еникеева Е.И., Андриянков М.А. Спектры ЯМР ^{15}N и ^{17}O виниловых эфиров пиридина и хинолина // Известия АН СССР. Серия химическая. 1987. № 4. С. 769–773.
23. Модонова Л.Д., Воронов В.К., Леонтьева В.Г., Тюкавкина Н.А. Лигниновые соединения из *ricea obtovata* // Химия природных соединений. 1972. № 2. С. 165–170.

24. Тюкавкина Н.А., Громова А.А., Луцкий В.И., Воронцов В.К. Оксистерильбены из коры *pinus sibirica* // Химия природных соединений. 1972. № 5. С. 600–603.
25. Voronov V.K., Voronkov M.G. The complexing ability and structure of Si-substituted silatranes // Journal of Molecular Structure. 1980. V. 67. P. 285–287.
26. Воронов В.К. Парамагнитные реагенты для изучения строения органических лигандов // Успехи химии. 1974. Т. 43. С. 432–454.
27. Воронов В.К., Ушаков И.А. Ядерный магнитный резонанс высокого разрешения в парамагнитных комплексах // Успехи химии. 2010. Т. 79. С. 915–928.
28. Voronov V.K., Ushakov I.A., Shmelev V.V., Sagdeev D.R. Peculiarities of intramolecular exchange and valence tautomerism in metal semiquinolates determined by high-resolution NMR spectroscopy // Magn. Reson. Chem. 2012. V. 50. P. 350–356.
29. Voronov V.K., Podoplelov A.V. Paramagnetic complexes in high resolution NMR spectroscopy. New York: Nova Science Publishers, 2015.
30. Voronov V.K. NMR Spectra Transformed by Electron-Nuclear Coupling as Indicator of Structural Peculiarities of Magnetically Active Molecular Systems // J. Phys. Chem. A. 2016. V. 120. P. 6688–6692.
31. Voronov V.K., Ushakov I.A., Funtikova E.A. NMR Spectra of 1-vinylimidazole, transformed by paramagnetic complexes // Appl. Magn. Reson. 2019. V. 50. P. 569–577.